Estudo de Modelos Matemáticos para Estimativa da Condutividade Térmica do Solo

Bruno Greco Peres, Universidade Federal do Pampa – Caçapava do Sul-RS
Leugim Corteze Romio, Universidade Federal do Pampa – Caçapava do Sul-RS

Copyright 2024, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no IX Simpósio Brasileiro de Geofísica, Salvador, 08 a 10 de outubro de 2024. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do X SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

Resumo

O estudo das propriedades térmicas do solo busca compreender as interações que ocorrem entre elas, de modo a auxiliar em diferentes áreas do conhecimento. O presente trabalho busca apresentar alguns dos principais modelos para estimativa da condutividade térmica do solo que, preferencialmente, incorporem diferentes fatores. Além disso, observar se os dados utilizados para ajuste/calibração dos modelos estão associados à região do bioma Pampa. Observa-se que os modelos, em geral, estimam a condutividade térmica do solo, com auxílio do fluxo de calor no solo e variações da temperatura. Outros modelos, correlacionam a condutividade a outras características do solo, em especial, modelos recentes têm associado a condutividade térmica do solo ao conteúdo de água no solo.

Introdução

O estudo das propriedades térmicas do solo busca compreender as interações que ocorrem entre elas, de modo a auxiliar em áreas como agricultura, hidrologia, atmosfera, além do próprio uso do solo (Shukla, 2014). As propriedades térmicas do solo estão relacionadas a um grande número de fatores tais como composição mineralógica, conteúdo de água no solo, presença de sal, textura, entre outros (An et al., 2016), o que pode tornar difícil suas estimativas.

Um especial destaque a condutividade e a difusividade térmicas do solo, as quais estão relacionadas ao fechamento do balanço de energia na superfície, sendo importantes para determinação do fluxo de calor no solo (G_0) e da temperatura do solo (Wang, Bou-Zeid, 2012). Para controlar os fatores que influenciam nestas propriedades, são propostos modelos que se utilizam de dados experimentais obtidos em laboratório ou *in situ* (em campo).

A condutividade térmica pode ser definida como a quantidade de calor que passa por unidade de tempo ao longo de uma área de seção transversal, sob uma unidade de gradiente de temperatura aplicada na direção do fluxo de calor (Farouki, 1981). A difusividade térmica pode ser expressa como a razão entre a condutividade térmica e a energia térmica necessária para aumentar, em 1º C, uma dada unidade de volume, quantidade de energia essa, também, conhecida com capacidade térmica volumétrica (Farouki, 1981).

Os primeiros estudos sobre propriedades térmicas do solo são datados dos anos 1846 (Forbes, 1846), desde então, um número expressivo de modelos têm sido desenvolvidos de modo a melhor compreender essas propriedades, associá-las a outras, além de analisar diferentes tipos de biomas, por meio de modelos específicos, por exemplo.

Este trabalho objetiva apresentar uma revisão bibliográfica dos diferentes modelos para estimativa da condutividade térmica do solo presentes na literatura técnica, em particular, modelos que foram utilizados em solos do bioma Pampa. Bioma este presente em uma grande porção do estado do Rio Grande do Sul-Brasil, além de porções do Uruguai e da Argentina (Boldrini, et al., 2010).

Metodologia

Teoricamente, a estimativa da condutividade térmica do solo pode ser realizada com medições experimentais de fluxo de calor no solo e temperatura do solo por meio da Lei de Fourier da condução de calor, definida por (Carslaw, Jaeger, 1959):

$$G_z = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z}$$

onde G_z (Wm^{-2}) é o fluxo de calor no solo a uma dada profundidade z (m), T (K) é a temperatura do solo e λ ($Wm^{-1}K^{-1}$) é a condutividade térmica do solo. Entretanto, os dados experimentais são medidos em certos intervalos de tempo (discretos), o gradiente de temperatura do solo ($\partial T/\partial z$) pode ser obtido pela taxa de variação da temperatura do solo pela profundidade, $\frac{\Delta T}{\Delta z} = \frac{T_2 - T_1}{z_2 - z_1}$, uma metodologia conhecida por Método Gradiente (Carslaw, Jaeger, 1959; Romio et al., 2019).

$$G_z = -\lambda \frac{T_2 - T_1}{z_2 - z_1}$$

Nesta abordagem, a estimativa da condutividade térmica do solo é obtida a partir das informações do fluxo de calor no solo e da temperatura do solo em duas profundidades. Entretanto, sabe-se que esta propriedade é influenciada por outros fatores, tais como, conteúdo de água no solo e composição mineralógica.

Por exemplo, a condutividade térmica do solo é influenciada pelo conteúdo de água no solo, de modo que um aumento na temperatura, implica em uma alteração no estado da água contida no solo que, consequentemente, afeta a condução de calor.

Considerando isso, pretende-se aqui apresentar modelos para estimativa da condutividade térmica do solo que, preferencialmente, incorporem diferentes fatores, conforme já mencionado. Além disso, observar se os

dados utilizados para ajuste/calibração dos modelos estão associados à região do bioma Pampa.

O trabalho aqui apresentado faz parte de uma pesquisa mais ampla a qual tem por um dos objetivos adicionais obter dados de sítios experimentais presentes no bioma Pampa a fim de avaliar se os modelos identificados permitem descrever adequadamente as propriedades térmicas do solo desse bioma.

Resultados

Estudos relacionados a propriedades térmicas têm seus primeiros registros em meados do século XIX com o trabalho de Forbes (1846) em que foram realizados alguns experimentos iniciais de medição de temperatura em diferentes profundidades e diferentes tipos de solo. Desde então um significativo número de pesquisas têm sido realizadas.

Em geral, a difusividade e a condutividade térmicas do solo são obtidas com auxílio de uma equação diferencial parcial, conhecida por “Lei de Condução de Calor”, a qual relaciona o fluxo de calor no solo a variação da temperatura em relação à profundidade e a condutividade térmica do solo. E, a variação vertical deste fluxo está relacionada a difusividade térmica do solo e a variação temporal da temperatura do solo. Entretanto, esta equação ao ser resolvida, normalmente, considera o solo como um sólido homogêneo isotrópico resolvido em uma dimensão (vertical), o que acaba limitando as características. Neste sentido, pesquisadores têm buscado aperfeiçoar modelos que melhorem as estimativas das propriedades térmicas do solo, utilizando de propriedades adicionais, tais como, umidade, porosidade, entre outros.

Dentre os modelos estudados, pode-se destacar o de De Vries (1963) o qual propôs estimar a condutividade térmica do solo como a razão entre os volumes de duas frações constituintes em diferentes profundidades do solo. Além disso, considerando que a condutividade térmica do solo é influenciada por diferentes fatores, tais como, tamanho das partículas do solo, forma, posição relativa, entre outros (Zang, Wang, 2017), o autor propôs, ainda, um modelo que estima a condutividade térmica do solo considerando o tamanho das partículas.

Pesquisas mais recentes têm identificado significativa relação da condutividade térmica do solo com o conteúdo de água no solo, como a pesquisa de Tong et al. (2009), que estudou a condutividade térmica do solo de um meio poroso e propôs um modelo que considera os efeitos do conteúdo de água no solo, porosidade, grau de saturação, temperatura e pressão.

Além de modelos analíticos, pesquisadores utilizaram-se de modelos empíricos para estimativa da condutividade térmica do solo, destacando-se o modelo de Johansen (1975) o qual propôs um conceito de “condutividade térmica normalizada” também conhecida por número de Kersten. Para normalizar o modelo, ele considerou condições de solo seco e saturado. Côté e Konrad (2005) propuseram uma modificação do modelo de Johansen (1975) de modo a levar em conta os efeitos do tipo de solo.

Lu et al. (2014) propuseram um modelo empírico para estimativa da condutividade térmica do solo em função do conteúdo de água no solo, contendo três parâmetros empíricos que podem ser calibrados em relação aos dados experimentais ou derivados da textura e densidade do solo. Nesta perspectiva, Tong et al. (2016) propuseram, também, um modelo empírico para estimativa da condutividade térmica do solo em função do conteúdo de água no solo e da porosidade do solo para utilizar em modelos de larga escala (simulações computacionais de biosfera, por exemplo).

Romio et al. (2019) propuseram um modelo numérico que utiliza dados experimentais, de laboratório ou *in situ*, para estimativa da condutividade térmica. Em particular, o modelo requer medidas de fluxo de calor no solo e temperaturas a diferentes profundidades, tendo por referência a equação de condução de calor em sólidos, discretizada e adicionada de um parâmetro empírico que representa, em linhas gerais, um fator de correção de fluxo de energia que pode não ter sido contabilizado durante as medições experimentais. Destaca-se esse modelo por ter utilizado dados da região do bioma Pampa, importante bioma do sul do Brasil.

Zimmer et al. (2023) estimaram diferentes propriedades térmicas do solo considerando dados experimentais *in situ*, em especial, correlacionando com o conteúdo de água no solo. De modo semelhante ao trabalho de Romio et al. (2019), esta pesquisa utilizou dados de uma região do bioma Pampa.

Estes são alguns dos modelos identificados, que, em geral, são discutidos em diferentes pesquisas relacionadas as propriedades térmicas do solo.

Discussão e Conclusões

Esta pesquisa buscou apresentar uma revisão bibliográfica dos principais modelos para estimativa da condutividade térmica do solo, em especial, modelos que relacionam a condutividade térmica do solo a outras propriedades/características.

Observa-se que os modelos, em geral, estimam a condutividade térmica do solo, com auxílio do fluxo de calor no solo e variações da temperatura. Outros modelos, correlacionam a condutividade a características do solo como sua composição (partículas que o compõem e seu tamanho). Mas, principalmente, os modelos mais recentes têm associado a estimativa da condutividade térmica do solo a variações no conteúdo de água no solo.

Em particular, os modelos relacionados ao conteúdo de água no solo podem ser implementados em ambientes computacionais de simulação de biosfera. Aperfeiçoando as previsões climáticas tanto regionais quanto em macro escala (globais).

Destaca-se, em especial, os modelos de Romio et al. (2019) e Zimmer et al. (2023), ambos avaliaram as propriedades térmicas do solo utilizando dados do bioma Pampa.

Por fim, relembra-se que este trabalho faz parte de um estudo mais amplo que envolve estudar diferentes

propriedades térmicas do solo e, em especial, analisá-las na região do bioma Pampa, a partir de dados experimentais. E, dentro do possível, identificar e/ou sugerir modelos que melhor expressem essas propriedades.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Federal do Pampa - UNIPAMPA por seu fomento científico.

Referências

An, K. et al., 2016. Estimation of ground heat flux from soil temperature over a bare soil. Theoretical and Applied Climatology, vol. 129(3): 913–922.

Boldrini, I. I. et al., 2010. Bioma Pampa: Diversidade Florística e Fisionômica, Pallotti: Porto Alegre-RS, Brasil.

Carslaw, H.S., Jaeger, J.C., 1959. Conduction of Heat in Solids, 4th ed., Oxford University Press: London, UK.

Côté, J., Konrad, J-M., 2005. A Generalized Thermal Conductivity Modelo for Soils and Construction Materials. Canadian Geotechnical Journal, vol. 42(2): 443-458.

De Vries, D. A., 1963. Thermal Properties of Soils. In: Van Wijk WR, editor. Physics of the Plant Environment. John Wiley & Sons, New York, US, p. 210e35.

Farouki, O. T., 1981. Thermal Properties of Soil. Monografia, U.S. Cold Regions Research Engineering Laboratory. Hanover.

Forbes, J. D., 1846. Account of some Experiments on the Temperature of the Earth at different Depths, and in different Soils, near Edinburgh. Transactions of the Royal Society of Edinburgh, vol. 16(2): 189-236.

Johansen O., 1975. Thermal Conductivity of Soils. Ph.D. Thesis. Trondheim, Norway:University of Trondheim. US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover.

Lu, Y. et al., 2014. An Empirical Model for Estimating Soil Thermal Conductivity from Texture, Water Content, and Bulk Density. Soil Science Society of America Journal, vol. 78: 1859-1868.

Romio, L. C. et al., 2019. A Numerical Model to Estimate the Soil Thermal Conductivity using Field Experimental Data. Applied Sciences, vol. 9(22), n. 4799.

Shukla, M. K., 2014. Soil Physics: An Introduction. CRC Press, Internacional.

Tong F. et al., 2009. An Effective Thermal Conductivity Model of Geological Porous Medium for Coupled Thermo-hydro-mechanical Systems with Multiphase Flow. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, vol. 46(8):1358-1369.

Tong, B. et al., 2016. An Empirical Model for Estimating Soil Thermal Conductivity from Soil Water Content and Porosity. American Meteorological Society, vol. 17:601-613.

Wang, Z-H., Bou-Zeid, E., 2012. A Novel Approach for the Estimation of Soil Ground Heat Flux. Agricultural and Forest Meteorology, vol. 154-155:214-221.

Zang, N., Wang, Z., 2017. Review os Soil Thermal Conductivity and Predictive Models. International Journal of Thermal Sciences, vol. 117: 172-183.

Zimmer, T. et al., 2023. Estimation of Soil Thermal Properties using Conduction and Conduction-Convection Heat Transfer Equations in the Brazilian Pampa Biome. Agricultural and Forest Meteorology, vol. 338, n. 109517.